

Bild 34. Unter Kriechbeanspruchung an Kerbproben erzielte Laufzeiten, Probe ohne Bruch ausgebaut (AG), 28CrMoNiV4-9, $T = 525\text{ °C}$

Ein Kriechversuch am Stahl X21CrMoV12-1 ebenfalls mit $K_t = 2,3$ wurde bis zum Bruch der Probe durchgeführt. Hier liegt die Bruchzeit bei gleicher Nennspannung wie an der glatten Probe wieder über dem ungekerbten Fall (Bild 36). Andererseits liegt die Bruchzeit der Kerbprobe unter der Zeitbruchkurve für den Fall mit der höheren Kerbschärfe $K_t = 4,5$.

Wie schon erwähnt, ist Zeitstandkerbverfestigung vom Werkstoff und vom Spannungszustand abhängig. Der Spannungszustand wird hauptsächlich von der äußeren Belastung und von der Kerbgeometrie bestimmt. Insbesondere bei duktilen Werkstoffen spielt die Zähigkeit eine tragende Rolle. Die bei Duktilität existierende Kerbverfestigung entsteht dadurch, dass die Verformung durch die von-Mises-Vergleichsspannung bestimmt wird, deren Maximum und Verteilung wegen der Mehrachsigkeit im Kerbgrund unterhalb der maximalen Hauptspannung liegt. Im Gegenteil dazu gleicht im einachsigen Fall die von-Mises-Spannung der in Belastungsrichtung liegenden Nennspannung.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für die Lebensdauerabschätzung von Hochtemperaturbauteilen mit Spannungsgradienten in herkömmlichen Auslegungskonzepten oft die maximal auftretende Spannung im Bauteil als Basis herangezogen wird. Dies führt bei duktilen Werkstoffen mit ausgeprägter Zeitstandkerbverfestigung zu sehr konservativen Lebensdauerabschätzungen. Für realistische Lebensdauerabschätzungen sind Kenntnisse zum Werkstoffverhalten unter Beanspruchung mit Spannungsgradienten notwendig, so dass eine Abhilfe zu Korrekturzwecken hergestellt werden kann.

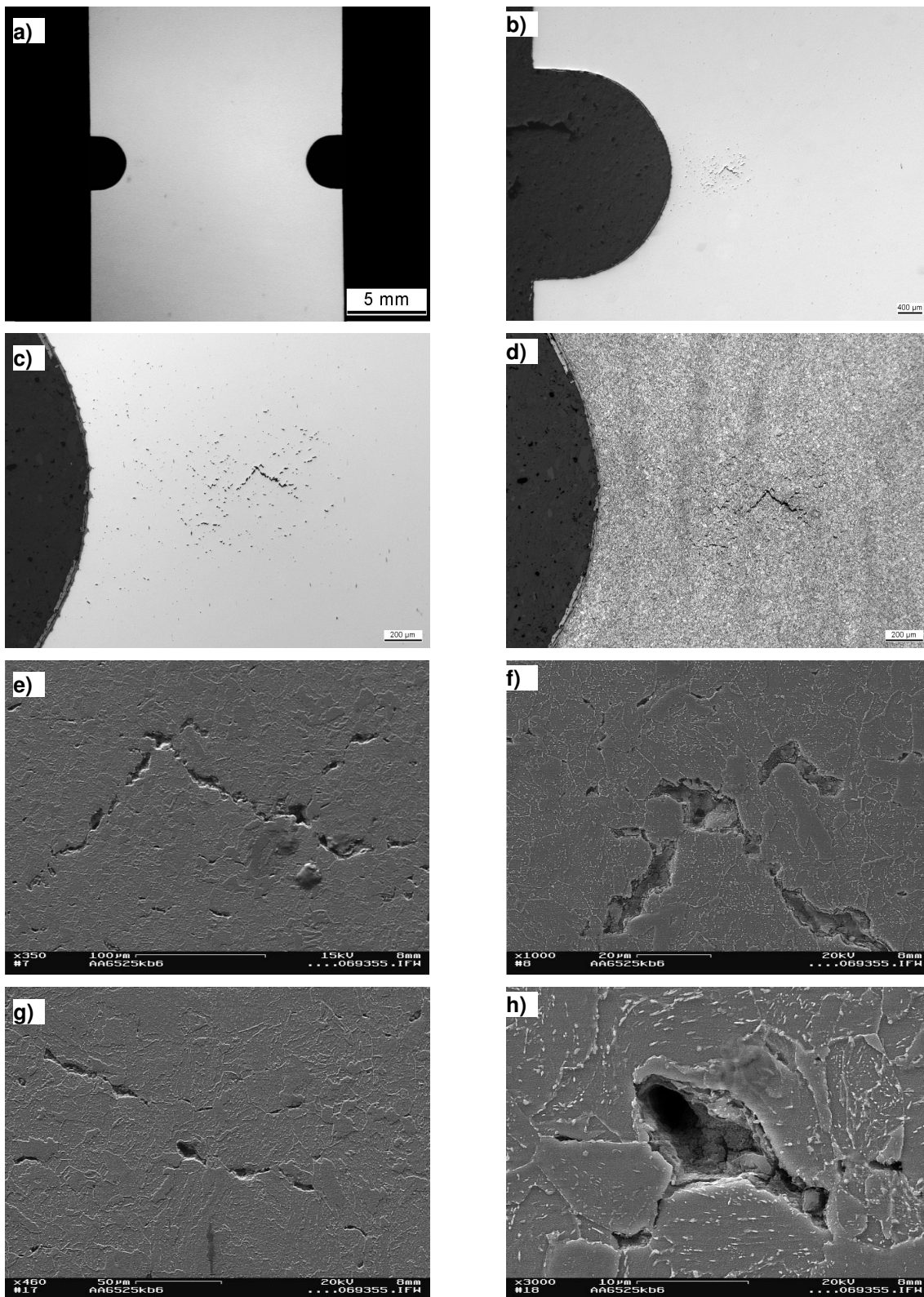


Bild 35. Anrissbefunde nach Kriechbeanspruchung an einer Kerbprobe (AAG525kb6), Laufzeit 1.631 h, (Tabelle 6), a) Lichtmikroskopische Übersichtsaufnahme, b) und c) Schädigungsverteilung weit unterhalb der Oberfläche an der ungeätzten Probe sowie d) an der geätzten Probe, e) und f) REM-Detailaufnahme der Porenverteilung, Porenzusammenlagerung und Mikrorissbildung entlang der Korngrenzen, g) und h) Detailaufnahme einer Pore

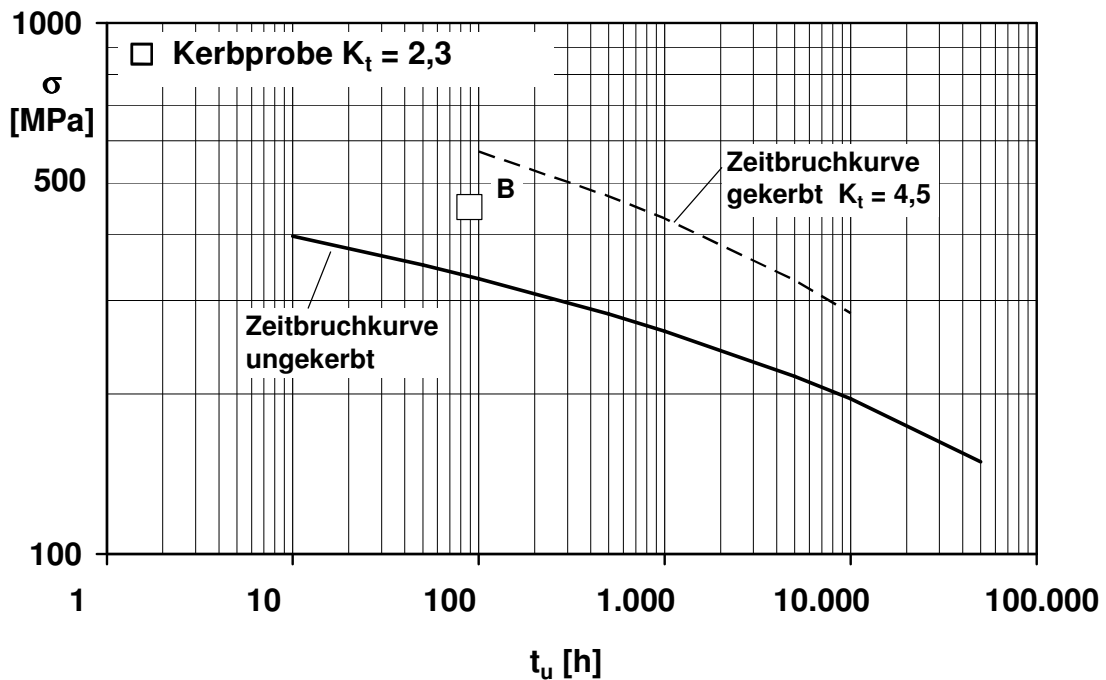


Bild 36. Unter Kriechbeanspruchung an Kerbproben erzielte Laufzeiten, Probe gebrochen, X21CrMoV12-1, $T = 550\text{ °C}$

5.4 Kriechermüdungsversuche an Kerbproben

Einen Überblick über die Ergebnisse zu den Kriechermüdungsversuchen (Lastwechselperiode: LWV) an Kerbproben an den Stählen 28CrMoNiV4-9 und X21CrMoV12-1 vermittelt Tabelle 6. Aus den im Folgenden geschilderten Ergebnissen dieser Versuche werden wichtige Angaben zu den für den Bauteilbetrieb relevanten zyklischen Vorgängen gemacht. Die Ergebnisse aus den Verformungsmessungen dienen wieder der Verifikation des in Kapitel 6 beschriebenen Materialmodells. Diese Versuche wurden in Kraftregelung bei zwei unterschiedlichen Werten der Nennspannungsschwingbreite ($\Delta\sigma_n$ in Tabelle 6) durchgeführt. Diese lässt sich aus der in der Probe wirkenden axialen Kraft und dem Kerbquerschnitt errechnen. Alle Versuche mit Ausnahme des Versuchs an der Probe AAG525kb3 wurden durch Anriss beendet.

Der prinzipielle Verlauf des Beanspruchungszyklus weist in Anlehnung an den betriebsähnlichen Dehnwechselzyklus aus vorangegangenen Arbeiten eine Anfahrphase mit Druckbeanspruchung, eine Betriebsphase mit langer Haltezeit mit Zugbeanspruchung und eine Abfahrphase ebenfalls unter Zugbeanspruchung auf (Bild 19). Die konkreten Spannungs-Zeitverläufe zeigen die ausgeprägten Zug- und Druckkraftausschläge und die zwei unterschiedlichen Fälle der Zyklusdauer von ca. 1 h und 3 h. Hierdurch sollte die Wirkung der Haltezeit mit untersucht werden. Die Spannungen wurden aus Musterrechnungen mithilfe des

Anwenderprogramms SARA [23] für Kriechermüdungsbeanspruchung abgeleitet. Die zu Beginn der Arbeit vorgenommenen Auswertungen zum Einfluss der Haltezeit ergaben, dass hinsichtlich der Wirkung von Kriecheffekten in den Haltezeiten zwischen 3 und 10 h ein vergleichbarer Unterschied wie zwischen 1 und 3 h ist. Daher wurde von der ursprünglichen Vorgehensweise längerer Haltezeiten abgewichen (Tabelle 4). Außerdem zeigte sich durch die aufwendigen Vorarbeiten bei der Durchführung dieser Versuche, dass die ursprünglich geplanten Laufzeiten nicht zu erreichen waren. Die Dehnrate wurde einheitlich betriebsnahe niedrig mit 0,06%/min eingestellt.

Am Stahl 28CrMoNiV4-9 wurden längste Laufzeiten von ca. 2.400 h erzielt. Wie aus dem Beispiel eines gemessenen Kraft-Zeitverlaufs (Probe AAG525kb3) und des entsprechenden Verlaufs der Axialdehnung hervorgeht (Bild 37), ist einerseits die gute Wiederholpräzision des Kraft-Zeitmesssignals zu erkennen und andererseits die relativ niedrigen Verformungen, die zu Beginn des Versuchs bei $\pm 2 \mu\text{m}$ liegen. Außerdem zeigt sich der stetige Anstieg der im Kerbgrund wirkenden axialen Verformung, der durch die hohen Spannungen zu begründen ist. Zum Vergleich sei hier die bei halber Anrisswechselzahl aus Versuchen an glatten Proben [23] ermittelte zyklische Fließgrenze $R_{p0,2} (N/N_A=0,5) = 300 \text{ MPa}$ bei 525 °C mit angegeben.

Einen Überblick über die gemessenen Dehnungs-Zeitverläufe aller Versuche gemäß Tabelle 6 zeigt Bild 38. Deutlich zu erkennen ist die starke Zunahme der Gesamtdehnung abhängig von der Belastungshöhe ausgedrückt durch die Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_n = 756 \text{ MPa}$, die wesentlich über dem zweifachen der zyklischen Fließgrenze liegt (Bild 38 a). Die Ursache hierfür ist in der für diesen Werkstoff typischen zyklischen Entfestigung zu suchen. Liegt dagegen die Belastung unter der zyklischen Fließgrenze, schreitet die Dehnung wesentlich langsamer voran (Probe AAG525kb8), während im Fall kurzer Haltezeit (Probe AAG525kb1) die Dehnungszunahme nach etwa 100 h zum Stillstand kommt und anschließend sogar negativ wird. Hier überwiegt vermutlich die in der Druckphase bei höherer Spannung im Vergleich zur Zughaltephase verstärkt wirkende Kriechdehnung, die zu einem Driften der Dehnung zu negativen Dehnungswerten hin führt.

Die Auftragung der Laufzeiten der Versuche im Anrisschaubild erfolgte auf unterschiedliche Weise (Bild 39). Die Versuche staffeln sich derart, dass zunehmende Haltezeit zu der erwarteten Lebensdauerverringerung führt, wie es auch für einaxiale Kriechermüdungsversuche bei warmfesten Stählen vielfach nachgewiesen wurde [10, 22, 23, 25, 55, 63]. Dabei wurde so vorgegangen, dass ähnlich wie bei der Anwendung des Lastabfallkriteriums zur Bestimmung der Anrisswechselzahl im Standarddehnwechselversuche der näherungsweise lineare Verlauf der Gesamtdehnung, hier die aus den Dehnungsausschlägen ermittelte Mitteldehnung, zur Definition des Anrisses herangezogen wurde. Die so ermittelten Werte sind in Bild 39 a und Tabelle 6 aufgetragen. Dieses Verfahren lässt Anrisstiefen von etwa 0,2 mm erwar-

ten. Das hier geschilderte Verfahren war bei dem Versuch an der Probe AAG525kb1 nicht anwendbar. Hier wurde die Anrisswechselzahl aus einer Extrapolation unter Berücksichtigung der vorhandenen Daten der vergleichbaren Versuche ermittelt.

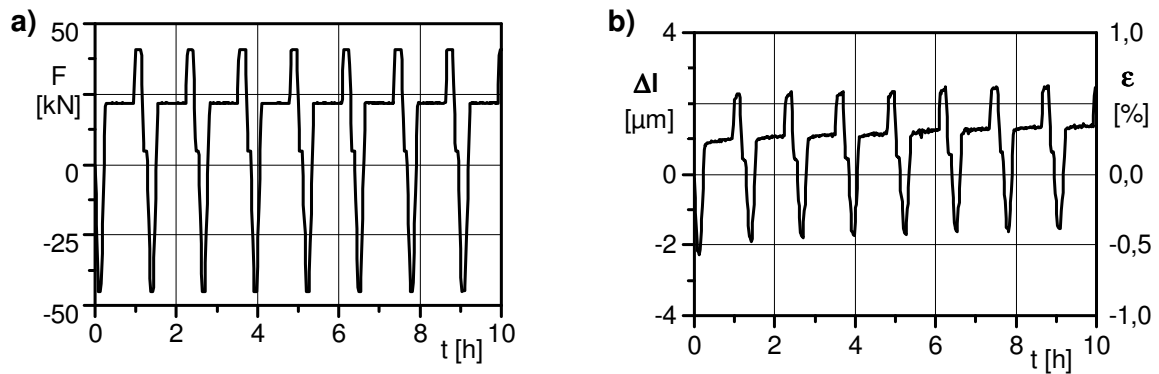


Bild 37. Beispiel eines gemessenen Kriechermüdungsversuches, 28CrMoNiV4-9, $T = 525^\circ\text{C}$: a) Kraft-Zeit-Verlauf und b) resultierende axiale Gesamtverlängerung Δl (linke Ordinate) und unter Bezugnahme auf die Anfangsmesslänge errechneter Axial-Gesamtdehnung ϵ (rechte Ordinate) im Kerbgrund

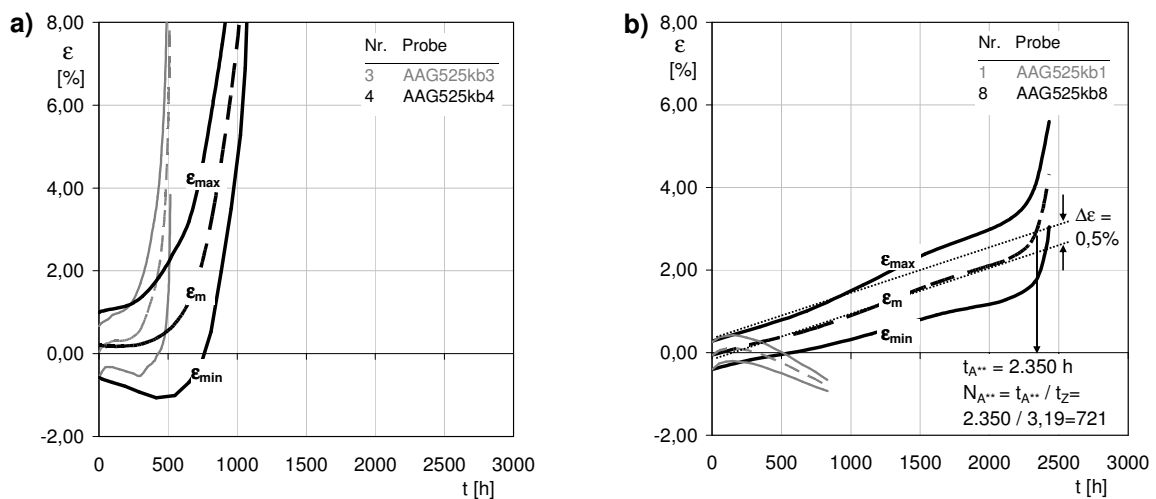
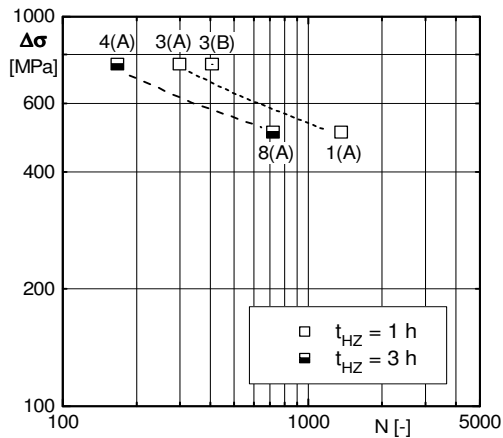
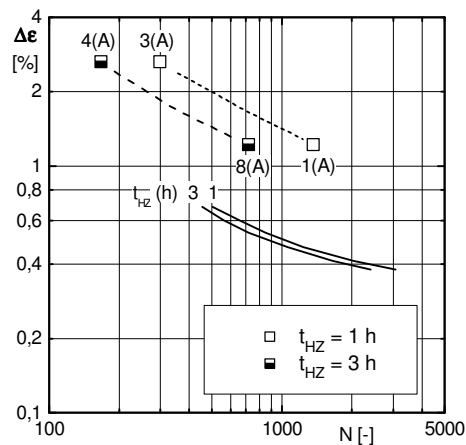


Bild 38. Gemessener zeitlicher Verlauf der maximalen Dehnungsausschläge (ϵ_{max} , ϵ_{min}) sowie der Mitteldehnung (ϵ_m) der Kriechermüdungsversuche an Kerbproben, 28CrMoNiV4-9, $T = 525^\circ\text{C}$: a) hohe Spannungsschwingbreite und b) niedriger Spannungsschwingbreite

a)



b)



c)

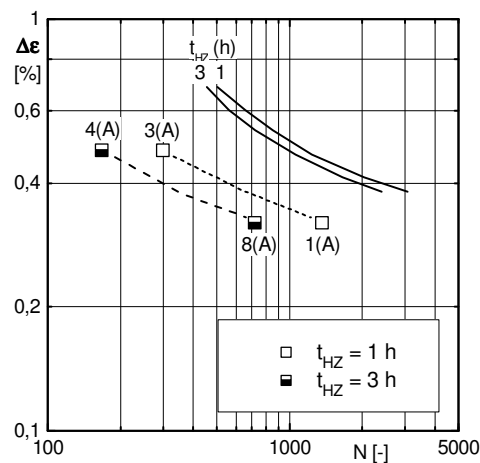


Bild 39. Ergebnisse der bis Anriss durchgeführten Kriechermüdungsversuche an Kerbproben gemäß Bild 38, Tab. 6, 28CrMoNiV4-9, $T = 525 \text{ °C}$, a) Spannungsschwingbreite über Anrisswechselzahl, b) Dehnungsschwingbreite über Anrisswechselzahl nach elastischer Umrechnung sowie Darstellung der aus einaxialen Kriechermüdungsversuchen ermittelten Anrisskennlinien mit 1 und 3 h Haltezeitssumme und c) Umrechnung über Neuber bei $d\epsilon/dt = 0,06 \text{ \%/min}$

Eine weitere Auftragung wurde mithilfe der Nenndeckung vorgenommen (Bild 39 b) mit dem Ziel, einen Vergleich zur einaxialen Beanspruchung herstellen zu können. Dazu wurde die Dehnungsschwingbreite mit der Nenndeckung $\Delta\epsilon_n$ aus der Spannungsschwingbreite $\Delta\sigma_n$ und dem Elastizitätsmodul E berechnet. Schließlich wurde mithilfe der Neuber-Hyperbel und unter Heranziehung einer zyklischen Fließkurve [23, 63] eine maximale Dehnung im Kerbgrund abgeschätzt (Bild 39 c).

Lichtmikroskopische als auch rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen am Beispiel der Probe AAG525kb1 ($t_A = 832 \text{ h}$) symmetrische Anrisse im Kerbgrund (Bild 40). In der Umgebung der Rissspitzen sind keine Poren infolge Kriechens bzw. Mikrorisse zu erkennen. Dies ist aufgrund der hohen Belastung und der entsprechend kurzen Laufzeit auch nicht zu erwarten.

Weiter wurde die Bruchfläche der Kerbprobe AAG525kb3 ($t_B = 520 \text{ h}$) untersucht (Bild 41). Die REM-Aufnahmen zeigen den Schädigungsprozess ringförmig ausgehend vom Kerbgrund in die Probenmitte hin, wobei eine relativ glatte Ermüdungsrissfläche im Kernbereich

der Probe die Restbruchfläche umschließt (Bild 41 a). Durch das abwechselnd wiederholte Öffnen und Schließen des Risses und durch die Verzunderung sind keine Rastlinien mehr zu erkennen. Im vergrößert dargestellten Bereich des Kerbgrunds (Bild 41 b) sind unterhalb des eigentlichen Risses mehrere, schichtweise angeordnete Anrisse zu sehen. Außerdem wechselt die Fläche des Hauptrisses die Anrissebene sprunghaft. Andere vergrößerte Ausschnitte machen deutlich, dass der Rissverlauf eine komplexe Struktur aufbauen kann, in der keine eindeutige Aussage mehr über seine genaue Richtung oder Form möglich ist (Bild 41 c und d).

Am Stahl X21CrMoV12-1 wurde bei 550 °C ein langzeitiger Kriechermüdungsversuch an einer Kerbprobe mit einer Laufzeit von über 4.800 h durchgeführt (Bild 42). Eine Dehnungsmessung im Kerbgrund konnte mangels eines Miniaturdehnungsaufnehmers nicht durchgeführt werden. Der Versuch wurde mit der Nenndehnung in das Anrisssschaubild der einaxialen Kriechermüdungsversuche eingetragen. Es zeigt sich eine deutlich längere Laufzeit im Vergleich zur einaxialen Beanspruchung.

Zusammenfassend sei festgehalten, dass die Ergebnisse zum Kriechermüdungsverhalten an beiden Stählen tendenziell übereinstimmen. In beiden Fällen erreichen die kraftgeregelten Experimente an Kerbproben deutlich längere Laufzeiten als die zum Vergleich herangezogenen dehnungsgeregelten zyklischen Versuche mit Haltezeit (Kriechermüdungsversuche) an glatten Rundproben. Offensichtlich ist auch die schon im Kriechfall beobachtete Zeitstandkerbverfestigung die Ursache für die lebensdauerverlängernde Wirkung, da die Haltezeiten den Hauptanteil an der Belastungsdauer ausmachen. Die Gründe hierfür wurden schon im Fall der unter reinem Kriechen beanspruchten Kerbproben erwähnt: Die durch Duktilität bzw. Zähigkeit des Werkstoffes bedingte Zustandigkeit der von-Mises-Spannung bei der mehrachsigen Beanspruchung und deren niedrigerer Maximalbetrag bzw. Verlauf im Vergleich zur axialen Spannung.

Die geschilderten Ergebnisse werden auch durch Untersuchungen an 10%Cr-Stählen bestätigt [63].

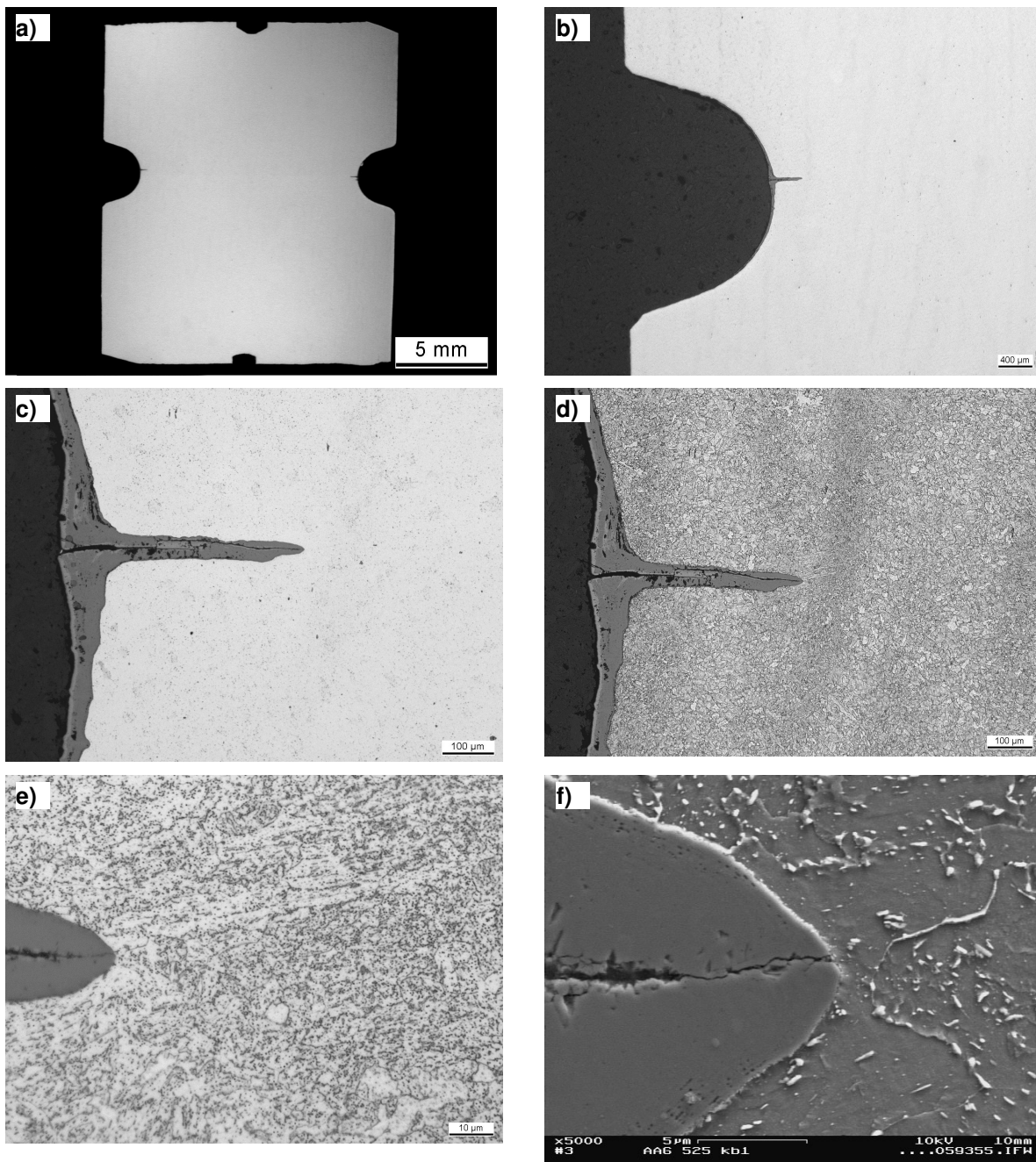


Bild 40. Anrissbefunde nach Kriechermüdigkeitsbeanspruchung an einer Kerbprobe (AAG525kb1), Laufzeit 832 h (Tabelle 6), a) Lichtmikroskopische Übersichtsaufnahme, b) und c) Rissbildung ohne Poren ausgehend von der Oberfläche aufgenommen an der ungeätzten Probe sowie d) an der geätzten Probe, e) Riss Spitze bei 1000-facher Vergrößerung und c) REM-Aufnahme mit 5000-facher Vergrößerung